



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ  
FAKULTA**  
Univerzita Karlova

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Adam Brček

# **Meteorické roje Virginid z dat Evropské bolidové sítě**

Astronomický ústav UK

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Jiří Borovička, CSc.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

Praha 2021

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů. Tato práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V ..... dne .....

Podpis autora

Moja velká vdaka patří RNDr. Jiřímu Borovičkovi, CSc. za jeho obrovskou pomoc a cenné rady při vypracovávání této bakalářské práce.

Název práce: Meteorické roje Virginid z dat Evropské bolidové sítě

Autor: Adam Brčák

Ústav: Astronomický ústav UK

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Jiří Borovička, CSc., Astronomický ústav AV ČR, v.v.i.

Abstrakt: Meteorická aktivita je v období od februára do apríla nízka, ale sú pozorovateľné viaceré slabé meteorické roje s radiantami v oblasti súhvezdia Panna a jeho okolí. Súhrnne tieto roje nazývame komplex Virginíd, pričom jeho najznámejšie roje sú  $\alpha$ -Virginidy a  $\eta$ -Virginidy. Cieľom tejto práce je skúmať ekliptikálne meteorické roje v tomto období. S využitím dát z Európskej bolidovej siete sa nám podarilo spresniť elementy heliocentrických dráh, určiť fyzikálne vlastnosti týchto rojov a taktiež získať dôkazy o existencii zatiaľ nepotvrdených rojov. Hlavným študovaným rojom sú  $\eta$ -Virginidy, u ktorých je diskutovaná štvorročná perióda aktivity, ich pôvod a vysoká pevnosť materiálu ich meteoroidov.

Klíčová slova: meteor, meteorický roj, radiant, heliocentrická dráha, meteoroid, fyzikální vlastnosti

Title: Virginid meteor complex from the data of the European Fireball Network

Author: Adam Brčák

Institute: Astronomical Institute of Charles University

Supervisor: RNDr. Jiří Borovička, CSc., Astronomical Institute, Academy of Sciences of the Czech Republic

Abstract: Meteor activity from February to April is low, but it is possible to observe several weak meteor showers with radiants in the constellation of Virgo and its proximity. We call these showers the Virginid Meteor Complex and its best known members are the  $\alpha$ -Virginids and  $\eta$ -Virginids. The goal of this work is the study of ecliptic meteor showers in the aforementioned time period. With the use of the data from the European Fireball Network, we managed to specify heliocentric orbit elements, determine physical properties of these showers and also gather evidence proving the existence of some unestablished showers. The emphasis is put on the  $\eta$ -Virginids as we discuss their four year cycle of activity, their origin, and high strength of material composing their meteoroids.

Keywords: meteor, meteor shower, radiant, heliocentric orbit, meteoroid, physical properties

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>2</b>
<b>1 Fyzika meteorov</b>	<b>3</b>
1.1 Základné pojmy . . . . .	3
1.2 Vznik meteorických rojov . . . . .	3
1.3 Ablácia a dynamický tlak . . . . .	4
1.4 Klasifikácia meteorov . . . . .	5
1.5 Heliocentrická dráha . . . . .	5
1.6 Kritériá príslušnosti k meteorickému roju . . . . .	6
<b>2 Meteorické roje v období pozorovania</b>	<b>8</b>
2.1 Meteorický komplex Virginíd . . . . .	8
2.1.1 $\eta$ -Virginidy . . . . .	8
2.1.2 $\alpha$ -Virginidy . . . . .	10
2.1.3 Ďalšie roje z komplexu Virginíd . . . . .	10
2.2 Iné ekliptikálne roje . . . . .	10
2.2.1 $\delta$ -Leonidy . . . . .	10
2.2.2 Ďalšie roje . . . . .	10
<b>3 Postup a výsledky merania</b>	<b>12</b>
3.1 Postup merania . . . . .	12
3.1.1 Európska bolidová sieť . . . . .	12
3.1.2 Spracovanie fotografií . . . . .	12
3.1.3 Výpočet heliocentrickej dráhy . . . . .	12
3.2 Výsledky merania . . . . .	13
3.2.1 $\eta$ -Virginidy . . . . .	14
3.2.2 $\alpha$ -Virginidy . . . . .	16
3.2.3 68 Virginidy . . . . .	18
3.2.4 $\kappa$ -Virginidy . . . . .	18
3.2.5 $\lambda$ -Leonidy . . . . .	19
3.2.6 Ostatné roje . . . . .	20
3.3 Diskusia . . . . .	21
<b>Záver</b>	<b>23</b>
<b>Zoznam použitej literatúry</b>	<b>24</b>
<b>A Prílohy</b>	<b>26</b>

# Úvod

Cieľom tejto práce je štúdium a analýza ekliptikálnych meteorických rojov v období od februára do apríla. Významnou skupinou rojov v tomto období je meteorický komplex Virginíd, ktorý je tvorený z viacerých menších meteorických rojov s radiantom v súhvezdí Panna (Virgo) alebo jeho blízkosti. Súčasťou tohto komplexu sú roje, ktoré ešte nepatria medzi tie oficiálne uznávané Medzinárodnou astronómickou úniou. Okrem iného sa pokúsime aj o potvrdenie existencie niektorých týchto rojov.

Táto práca je tvorená z troch kapitol. V prvej kapitole sa budeme zaoberať teóriou meteorov, konkrétne ich pôvodu, vlastnostiam, tomu ako popisovať ich pohyb okolo Slnka a ako môžeme z nameranej dráhy meteoru určiť jeho príslušnosť k meteorickému roju.

V druhej kapitole sa zameriame na problematiku meteorického komplexu Virginíd. Z akých rojov pozostáva? Aký je ich pôvod? Aké iné ekliptikálne roje v tomto období pozorujeme? To sú otázky, na ktoré budeme hľadať odpovede. V tejto kapitole taktiež uvedieme známe parametre ich heliocentrickej dráhy z IAU Meteor Data Center, ktoré využijeme k neskoršej diskusii a zhrnieme niektoré známe vlastnosti týchto rojov.

Posledná časť bude venovaná popisu merania a vyhodnotenia dát z Európskej bolidovej siete, diskusii nameraných výsledkov a porovnaní s výsledkami od iných autorov. Diskusia bude zameraná na meteorické roje, ktoré disponujú väčším množstvom dát. Nami nameraných meteorov, ku ktorým by sme vedeli určiť príslušnosť nie je mnoho, avšak sú vďaka postupu merania určené s veľmi vysokou presnosťou.

# 1. Fyzika meteorov

## 1.1 Základné pojmy

Slnčná sústava je plná malých častíc alebo telies, ktoré nazývame *meteoroidy*. Môže sa jednať o čiastočky prachu, zrnká piesku alebo aj väčšie kamene. Čo sa týka rozmerov, tak meteoroidy ich majú v rozmedzí zhruba  $30\text{ }\mu\text{m}$  a  $1\text{ m}$ .

Niektoré meteoroidy sa môžu zraziť so zemskou atmosférou s rýchlosťou  $10$  až  $70\text{ km/s}$  (Seeds, 2016, kapitola 16). Trenie so vzduchom v atmosfére spôsobuje zohrievanie a odparovanie meteoroidu, ktorý môže aj ionizovať vzduch a následne pozorovaná svetelná stopa sa nazýva *meteor*. K tomuto javu môže dôjsť na každej planéte alebo mesiaci s dostatočne hustou atmosférou. Špeciálnym prípadom je *bolid*, ktorý sa vyznačuje jasnosťou presahujúcou  $-4\text{ mag}$ . Ak je meteoroid dostatočne veľký a pevný, tak môže atmosférou prejsť a dopadnúť na povrch Zeme. V takom prípade hovoríme o *meteorite*.

Skupiny meteoroidov so spoločnou dráhou v slnečnej sústave umožňujú vznik *meteorických rojov*. Tento jav je pozorovateľný v čase, kedy sa ich dráha kríži s dráhou Zeme. Meteoroidy prislúchajúce jednému meteorickému roju majú takmer rovnobežné trajektórie a pre pozorovateľa na Zemi sa to prejaví tak, že všetky meteory vychádzajú z jedného miesta na oblohe, ktoré nazývame *radiant*. Pre pozemského pozorovateľa je ale smer radiantu daný súčtom vektorov rýchlosti meteoroidu a rotácie Zeme, pričom je ovplyvnený aj jej príťažlivosťou. Takýto radiant nazývame zdanlivý. V ďalších kapitolách ale budeme používať geocentrický radiant, ktorého polohu by sme videli v sústave spojennej so stredom Zeme. Taktiež rýchlosť meteoroidu pozorovaná v tejto sústave má prívlastok geocentrická. Poloha geocentrického radiantu bude daná rektascenziou  $\alpha$  a deklináciou  $\delta$ . Je potrebné brať do úvahy aj to, že Zem sa neustále pohybuje okolo Slnka, čo spôsobuje mierny posun polohy radiantu s časom. Ten závisí od ekliptikálnej dĺžky Slnka a taktiež rozdelenia meteoroidov na ich obežnej dráhe. Pre posun v rektascenzii a deklinácii budeme používať veličiny  $d\alpha$  a  $d\delta$ , ktoré udávajú zmenu rektascenzie a deklinácie na jeden stupeň slnečnej dĺžky.

## 1.2 Vznik meteorických rojov

Meteoroidy typicky vznikajú z rozpadov komét alebo zo zrážky asteroidov. Takto vzniknuté meteoroidy obiehajú okolo Slnka po keplerovskej dráhe, ovplyvnené gravitáciou planét ale aj negravitačnými silami. Identifikácia materského telesa môže byť veľmi náročná.

Kometárne meteorické roje vznikajú postupným rozpadom jadra kométy. Časť hmoty kométa stráca kvôli výtryskom hmoty z jej vnútra. Jedným z vysvetlení je, že tieto „jety“ unikajú z úzkych otvorov v uzavretých podpovrchových dutinách. V nich môže dôjsť ku kumulácii vodnej pary a následnému výtrysku plynu a prachu. Doposiaľ známe kométy sa vyznačujú malou objemovou hustotou, typicky nižšou ako je hustota ľadu (Jenniskens, 2006, kapitola 2).

U asteroidov by sme očakávali stabilnejšiu hmotu a rozličné chemické a mineralogické vlastnosti. Práve vďaka väčšej pevnosti prenikajú meteoroidy asteroidálneho pôvodu hlbšie do atmosféry a môžu dopadnúť až na zemský povrch ako

meteority. Meteority môžeme rozdeliť do štyroch základných skupín: chondrity, achondrity, železné a železno-kamenné meteority. Chondrity sú najbežnejším typom meteoritu a vyznačujú sa chondrami, malými guľovými útvarmi vo vnútornej štruktúre meteoritu. Achondrity tieto útvary neobsahujú, prípadne obsahujú len ich relikty. Chondrity a achondrity súhrnne nazývame kamenné meteority. Železné meteority sa vyznačujú dominantným obsahom železa a pri pozorovaní meteoru je ukazovateľom to, že ku ablácii dôjde pomerne vysoko v atmosfére, kvôli väčšej tepelnej vodivosti železa.

Už samotná obežná dráha telesa nám napovedá, či sa jedná o kométu alebo asteroid. Jednou z metód je použitie *Tisserandovho parametra*. Ten sa vzťahuje k Jupiteru ako najhmotnejšej planéte slnečnej sústavy a je významný tým, že sa jedná o invariant. To znamená, že ak dôjde ku zmene obežnej dráhy telesa pod vplyvom gravitačného pôsobenia Jupitera, tak hodnota tohto parametra ostane zachovaná. Tisserandov parameter je zavedený ako (Jenniskens, 2006, kapitola 8)

$$T_J = \frac{a_J}{a} + 2 \cos(i) \sqrt{(1 - e^2) \frac{a}{a_J}}, \quad (1.1)$$

kde  $a_J$  je veľkosť hlavnej polosi obežnej dráhy Jupitera,  $a$  je veľkosť hlavnej polosi dráhy skúmanej kométy alebo asteroidu,  $i$  je jej sklon voči rovine ekliptiky a  $e$  je jej excentricita. Kométy Jupiterovej rodiny zvyknú mať hodnotu  $T_J$  medzi 2 a 3, kométy typu Halleyho kométy mávajú  $T_J < 2$  a asteroidy mávajú  $T_J > 3$ . Toto rozdelenie ale rozhodne nie je fixné a poskytuje len akýsi odhad, o aký objekt sa môže jednať.

### 1.3 Ablácia a dynamický tlak

Meteoroid pri prechode atmosférou stráca časť svojej hmotnosti a tento proces sa nazýva *ablácia*. Ablácia závisí od veľkosti a hmotnosti meteoroidu, jeho vstupnej rýchlosti, výške letu a zloženia. Pre popis miery ablácie meteoroidu sa využíva ablačný koeficient, ktorý je definovaný vzťahom (Ryabova a kol., 2019, kapitola 1)

$$\sigma = \frac{\Lambda}{2Q\Gamma}, \quad (1.2)$$

kde  $\Lambda$  je koeficient tepelnej výmeny, ktorý určuje zlomok prichádzajúceho energetického toku dosahujúceho povrch meteoroidu.  $Q$  je ablačné teplo vrátane celkovej energie potrebnej na roztopenie alebo odparenie materiálu meteoroidu a  $\Gamma$  je trecí koeficient popisujúci účinnosť prenosu hybnosti.

Ďalšou dôležitou veličinou je *dynamický tlak* pôsobiaci na meteoroid. Jeho veľkosť môžeme odhadnúť pomocou vzťahu (Brož, 2013, kapitola 3.12)

$$p = \frac{1}{2} \Gamma \rho_a v^2, \quad (1.3)$$

kde  $\rho_a$  je hustota atmosféry a  $v$  odpovedá rýchlosti meteoroidu. V prípade, že dynamický tlak prekročí medzu pevnosti materiálu, tak dôjde ku *fragmentácii* meteoroidu (rozpadu na menšie časti).



## 1.4 Klasifikácia meteorov

V prípade meteoritov, ktoré dopadnú na zem vieme chemickou analýzou určiť zloženie. Drvivá väčšina meteoroidov ale v atmosfére zhorí a na analýzu fyzikálnych a chemických vlastností je možné využiť len žiarenie a ionizačnú stopu. Nástrojom pre určenie druhu a odhadu zloženia pozorovanému meteoru je  $P_E$  parameter, ktorý je definovaný vzťahom (Ceplecha a McCrosky, 1976)

$$P_E = \log \rho_E - 0,42 \log m_\infty + 1,49 \log v_\infty - 1,29 \log \cos z_R, \quad (1.4)$$

kde  $\rho_E$  je hustota atmosféry na konci svietivej dráhy meteoru v  $\text{g.cm}^{-3}$ ,  $v_\infty$  je vstupná rýchlosť meteoru do atmosféry v  $\text{km.s}^{-1}$ ,  $z_R$  je zenitová vzdialenosť radiantu a  $m_\infty$  je počiatočná hmotnosť meteoroidu určená zo svetelnej krivky. Použitím tohto vzťahu rozdeľujeme meteory do štyroch kategórií (Tabuľka 1.1). Zaradenie meteoru do jednej z týchto kategórií nám dáva informáciu o zložení daného meteoroidu a umožňuje aj odhadnúť jeho hustotu  $\rho_m$  a pevnosť.

Určením parametru  $P_E$  môžeme teda odhadnúť, z akého materského telesa meteoroid pochádzal. Do typu I spadá kamenný materiál (obzvlášť obyčajné chondrity), typ II je spájaný s uhlíkatými chondritmi, typ IIIA je typický kometárny materiál a typ IIIB je mäkký kometárny materiál. Platí ale, že medzi obežnou dráhou a fyzikálnou klasifikáciou neplatí žiadny priamy vzťah (Ryabova a kol., 2019, kapitola 2). Je dôležité podotknúť, že rozmedzia pre jednotlivé typy platia pre bolidy s magnitúdami  $-5$  až  $-15$ . Analýza bolidov mimo tohto intervalu magnitúd použitím vzťahu (1.4) môže viesť k nesprávnym záverom.

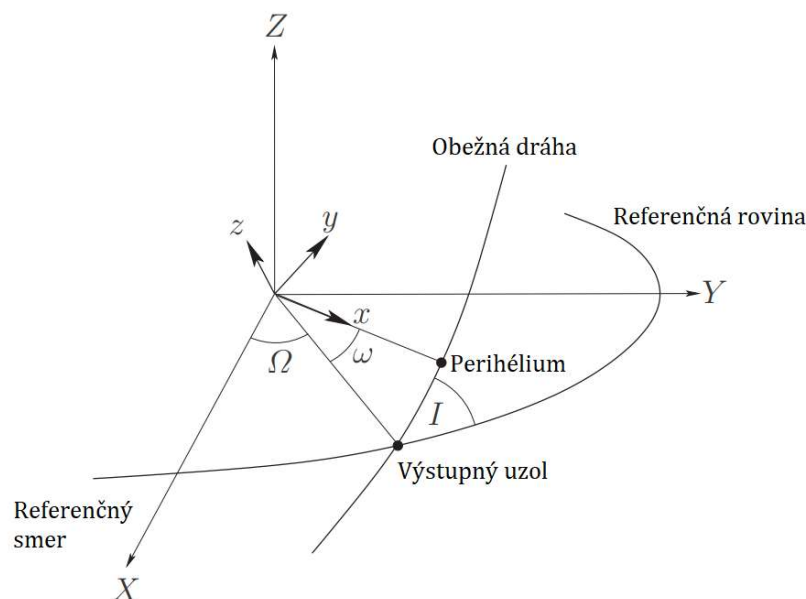
## 1.5 Heliocentrická dráha

Z prvého Keplerovho zákona vieme, že všetky planéty sa pohybujú po elipsách. Rovnaké tvrdenie platí aj pre všetky objekty, ktoré obiehajú okolo Slnka s nejakou periódou (napr. kométy a asteroidy). Ako teda môžeme popisovať eliptickú dráhu týchto objektov okolo Slnka?

Vychádzajme zo schémy na Obr. 1.1. Nech má obežná dráha nami sledovaného telesa tvar elipsy. Táto elipsa je charakterizovaná dvoma číslami: hlavnou polosou  $a$  a excentricitou  $e$  (jeden z parametrov by sme mohli zameniť napríklad za perihéliovú vzdialenosť  $q$ ). V jednom z ohnísk elipsy bude Slnko, ktoré je zároveň počiatkom našej súradnicovej sústavy  $X, Y, Z$ . Osi  $X$  a  $Y$  definujú našu referenčnú rovinu, ktorú volíme ako rovinu ekliptiky (rovina obežnej dráhy Zeme). Referenčným smerom je jarný bod, daný polohou Slnka na oblohe v čase jarnej rovnodennosti. Sklon obežnej dráhy sledovaného objektu voči referenčnej rovine

Tabuľka 1.1: Klasifikácia meteorov podľa parametra  $P_E$ . Zdroj: Ryabova a kol. (2019, kapitola 2).

Typ	I	II	IIIA	IIIB
$P_E$	$< -4,60$	$< -5,25$	$< -5,70$	$\geq -5,70$
$\sigma \text{ [s}^2.\text{km}^{-2}\text{]}$	$< 0,025$	$< 0,075$	$< 0,15$	$\geq 0,15$
$\rho_m \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$	3500	2000	750	270



Obr. 1.1: Elementy heliocentrickej dráhy. Zdroj: Fitzpatrick (2012).

je daný *inklínáciou*  $I$ . Bod, v ktorom táto obežná dráha pretína referenčnú plochu v smere rastúceho  $Z$  sa nazýva *výstupným uzlom*. Uhol medzi referenčným smerom a výstupným uzlom sa nazýva *dĺžka výstupného uzla* a značíme ho  $\Omega$ . Uhol medzi výstupným uzlom a perihéliom obežnej dráhy sa nazýva *argument perihélia*, ktorý označujeme  $\omega$ .

Ak by sme uvažovali iný kartézsky systém  $x, y, z$ , tak vhodnými rotáciami o uhly  $\omega, I, \Omega$  okolo osí  $z, x, z$  by sme mohli túto súradnicovú sústavu transformovať na sústavu  $X, Y, Z$ .

Pri meteorických rojoch je dôležitá informácia, na akom mieste svojej obežnej dráhy sa nachádzala Zem pri pozorovaní daného meteoru. Túto informáciu nám poskytuje *slnečná dĺžka*  $\lambda_{\odot}$ , ktorá udáva ekliptikálnu dĺžku Slnka a definujeme ju nulový v jarnom bode. V nasledujúcich kapitolách ju budeme uvažovať vztiahnutú k epoche J2000.0.

S obežnými dráhami súvisí aj pojem *orbitálnej rezonancie*, ktorá môže vzniknúť medzi dvoma telesami, ktoré na seba gravitačne vplyvajú. Pri rezonancii sú doby obehu dvoch telies v pomere celých čísel. Ak by sme napríklad určili obežnú dobu asteroidu a hovorili by sme o rezonancii 3:1 s Jupiterom, tak by to znamenalo, že za každý obeh Jupitera okolo Slnka spraví asteroid tri obehy a zároveň sa stretnú v rovnakej konjunkcii.

## 1.6 Kritériá príslušnosti k meteorickému roju

Po zmeraní elementov dráhy pre skúmaný meteoroid je ďalším krokom porovnanie s parametrami už známych meteorických rojov. To, či niektorý meteor patrí k meteorickému roju nemusí byť ľahké určiť a môže sa to zdať ako subjektívne. Môžeme ale podobnosť dvoch obežných dráh nejako kvantifikovať? Práve

pre tieto účely existujú rôzne kritériá a my si ukážeme výpočet dvoch z nich.

Prvé z nich formulovali Southworth a Hawkins (1963) a pre dve skúmané telesá  $A$  a  $B$  je dané výpočtom nasledovného parametra

$$D_{SH}^2 = (e_B - e_A)^2 + (q_B - q_A)^2 + \left(2 \sin \frac{i_{BA}}{2}\right)^2 + \left(\frac{e_B + e_A}{2}\right)^2 \left(2 \sin \frac{\pi_{BA}}{2}\right)^2, \quad (1.5)$$

kde  $i_{BA}$  je uhol medzi rovinami porovnávaných obežných dráh a  $\pi_{BA}$  je vzdialenosť dĺžok perihélia meraná z bodu prieniku obežných dráh. Pre tieto argumenty platia vzťahy

$$\left(2 \sin \frac{i_{BA}}{2}\right)^2 = \left(2 \sin \frac{I_B - I_A}{2}\right)^2 + \sin I_B \sin I_A \left(2 \sin \frac{\Omega_B - \Omega_A}{2}\right)^2, \quad (1.6)$$

$$\pi_{BA} = (\omega_B - \omega_A) + 2 \arcsin \left( \cos \frac{I_B + I_A}{2} \sin \frac{\Omega_B - \Omega_A}{2} \sec \frac{i_{BA}}{2} \right), \quad (1.7)$$

pričom platí podmienka, že ak  $|\Omega_B - \Omega_A| > 180^\circ$ , potom znamienko pri  $\arcsin$  je opačné. O podobnosti dvoch obežných dráh budeme uvažovať v prípade, že  $D_{SH} \leq 0,20$ .

Druhé kritérium, ktoré budeme využívať, formuloval Drummond (1981) a to pomocou parametra  $D_D$  definovaného vzťahom

$$D_D^2 = \left(\frac{e_B - e_A}{e_B + e_A}\right)^2 + \left(\frac{q_B - q_A}{q_B + q_A}\right)^2 + \left(\frac{i_{BA}}{180^\circ}\right)^2 + \left[\left(\frac{e_B + e_A}{2}\right) \left(\frac{\theta_{BA}}{180^\circ}\right)\right]^2, \quad (1.8)$$

kde  $\theta_{BA}$  je uhol medzi hlavnými osami obežných dráh daný vzťahom

$$\theta_{BA} = \arccos (\sin \beta_B \sin \beta_A + \cos \beta_B \cos \beta_A \cos (l_B - l_A)). \quad (1.9)$$

Argumenty  $\beta$  a  $l$  sú ekliptikálne súradnice perihélia, pre ktoré platí

$$l = \Omega + \arctan (\cos I \tan \omega), \quad (1.10)$$

$$\beta = \arcsin (\sin I \sin \omega). \quad (1.11)$$

V prípade použitia tohto kritéria môžeme uvažovať o podobnosti dvoch obežných dráh v prípade, že  $D_D \leq 0,10$ .

## 2. Meteorické roje v období pozorovania

### 2.1 Meteorický komplex Virginíd

Počas obdobia od Februára do Apríla je meteorická aktivita relatívne nízka. Je ale možné pozorovať väčšiu aktivitu meteorov vychádzajúcich zo súhvezdí Lev a Panna, ktoré súhrnne nazývame *komplex Virginíd*. Z tohto meteorického komplexu sú len tri meteorické roje, ktoré patria medzi roje oficiálne uznávané Medzinárodnou astronómickou úniou (IAU) a my sa budeme zaujímať hlavne o  $\eta$ -Virginidy a  $\alpha$ -Virginidy. Medzi tie, pre ktoré existujú namerané dáta, ale ešte nie sú oficiálne potvrdenými, patria napríklad severné a južné marcové Virginidy,  $\lambda$ -Virginidy, severné a južné  $\gamma$ -Virginidy,  $\kappa$ -Virginidy,  $\mu$ -Virginidy alebo 68 Virginidy. Virginidy sa vyznačujú pomerne veľkým prienikom do atmosféry a málo častou fragmentáciou, čo vypovedá o pevnosti materiálu (Jenniskens, 2006, kapitola 28).

Táto práca je teda zameraná na ekliptikálne meteorické roje, čiže roje vyznačujúce sa sklonom dráhy menším ako  $15^\circ$  a hlavnou polosou menšou ako 5 au. Z IAU Meteor Data Center<sup>1</sup> boli prebrané polohy geocentrických radiantov, ich posun a geocentrická rýchlosť bolidu pre vybrané meteorické roje z komplexu Virginíd (Tabuľka 2.1) a rovnako aj orbitálne elementy týchto rojov (Tabuľka 2.2). Každý meteorický roj má Medzinárodnou astronómickou úniou priradené identifikačné číslo a trojpísmenový kód. V tabuľkách sú uvedené hodnoty od rôznych autorov, keďže jedným z našich cieľov je určenie toho, ktoré parametre sú tie najpresnejšie.

#### 2.1.1 $\eta$ -Virginidy

Jedným z najaktívnejších rojov sú práve  $\eta$ -Virginidy (EVI) dosahujúce maximum aktivity približne v polovici marca. Roj má nezvyčajné distribúcie radiantov: v priebehu aktivity sa ekliptikálna šírka mení len veľmi málo v porovnaní s ekliptikálnou dĺžkou. Toto môže nasvedčovať tomu, že sa jedná o relatívne mladý meteorický roj (Jenniskens a kol., 2016a).

Pôvod tohto meteorického roja nie je známy, avšak Babadzhanov a kol. (2015) prišiel s hypotézou, že jeho materským telesom je asteroid s označením 2007 CA<sub>19</sub>. Ide o asteroid s Tisserandovým parametrom odpovedajúcim kométam a malo by sa jednať o vyhasnutú alebo neaktívnu kométu Jupiterovej rodiny, ktorá počas svojej aktivity vytvorila tento meteorický roj.

Zaujímavosťou tohto meteorického roja je to, že aktivita dosahuje maximum každé štyri roky, ako poukazuje Shiba (2018). Táto periodicita je spôsobená rezonanciou 3:1 s Jupiterom, vďaka ktorej dôjde k nahromadeniu väčšieho množstva meteoroidov v jednom mieste obežnej dráhy. V priebehu dvanástich rokov pozorovaní sieťou SonotaCo boli určené maximá aktivity v rokoch 2009, 2013 a 2017. Na druhej strane, v rokoch 2007, 2008, 2011, 2012, 2015 a 2016 nebola pozorovaná takmer žiadna aktivita.

<sup>1</sup><https://www.ta3.sk/IAUC22DB/MDC2007/index.php>

Tabuľka 2.1: Poloha geocentrického radiantu a geocentrické rýchlosti pre vybrané meteorické roje z komplexu Virginíd. Zdroj: IAU Meteor Data Center.

No.	Názov roja	Kód	$\alpha$ [°]	$\delta$ [°]	$d\alpha$	$d\delta$	$v$ [km.s <sup>-1</sup> ]	Pozn.
011	$\eta$ -Vir	EVI	184,8	3,9	0,92	-0,40	26,6	J16a
			182,1	2,6	1,00	-0,37	29,2	J06
			174,3	4,7	0,90	0,31	34,2	L71
			184,2	2,9	0,80	-0,15	26,6	Sh18
021	$\alpha$ -Vi	AVB	203,5	2,9	0,91	-0,36	18,8	J16c
			195,6	-5,3	—	—	16,6	L71
			185,4	9,6	—	—	16,8	SH
651	68 Vir	OAV	202,0	-13,5	0,95	-0,37	28,9	J16b
509	$\kappa$ -Vir	KVI	208,0	-8,0	0,92	-0,35	37,4	Š13
123	S. mar. Vir	NVI	174,3	8,7	0,90	0,40	23,0	K88
			185,7	2,3	—	—	23,0	Se73
049	$\lambda$ -Vir	LVI	210,7	-10,2	—	—	26,8	L71
047	$\mu$ -Vir	DLI	226,8	-8,7	—	—	28,3	PG
134	S. $\gamma$ -Vir	NGV	180,6	17,7	—	—	11,7	T89
135	J. $\gamma$ -Vir	SGV	183,2	-15,5	—	—	13,9	PG

*Pozn.:* J16a: Jenniskens a kol. (2016a), J06: Jenniskens (2006), L71: Lindblad (1971), Sh18: Shiba (2018), SH: Southworth a Hawkins (1963), J16b: Jenniskens a kol. (2016c), Š13: Šegon a kol. (2013), K88: Kronk (1988), Se73: Sekanina (1973), PG: Porubcan a Gavajdova (1994), T89: Terentjeva (1989).

Tabuľka 2.2: Orbitálne elementy pre vybrané meteorické roje z komplexu Virginíd. Zdroj: IAU Meteor Data Center.

Kód	$\lambda_{\odot}$ [°]	$a$ [au]	$q$ [au]	$e$	$\omega$ [°]	$\Omega$ [°]	$I$ [°]	Pozn.
EVI	357,0	2,47	0,460	0,812	281,0	355,7	5,4	J16a
	354,0	2,56	0,382	0,851	349,1	280,5	3,5	J06
	354,0	2,64	0,234	0,911	308,0	334,5	3,5	L71
	356,5	2,34	0,455	0,806	282,6	356,5	5,2	Sh18
AVB	32,0	2,55	0,744	0,716	247,9	30,0	7,0	J16c
	28,9	2,35	0,750	0,681	247,5	28,9	0,7	L71
	21,7	2,58	0,690	0,733	240,4	21,7	4,2	SH
OAV	16,0	2,36	0,392	0,842	109,8	197,4	4,7	J16b
KVI	6,0	2,50	0,139	0,938	321,0	6,0	8,0	Š13
NVI	353,5	1,96	0,728	0,628	252,7	353,5	3,7	K88
	358,0	1,69	0,496	0,707	282,4	358,0	3,7	Se73
LVI	20,0	2,63	0,343	0,870	295,0	20,2	2,0	L71
DLI	39,0	2,53	0,418	0,835	286,5	38,3	9,1	PG
NGV	24,3	2,25	0,908	0,596	221,7	24,3	5,2	T89
SGV	22,7	2,26	0,867	0,617	50,0	212,7	5,0	PG

### 2.1.2 $\alpha$ -Virginidy

Druhým potvrdeným meteorickým rojom sú  $\alpha$ -Virginidy (AVB). Materské teleso tohto roja nie je známe, avšak medzi možných kandidátov patrí potenciálne vyhasnuté kometárne jadro 1998 SH<sub>2</sub> alebo objekt 2002 GM<sub>5</sub>, ktorý je pravdepodobne asteroidom (Jenniskens, 2006, kapitola 28).

### 2.1.3 Ďalšie roje z komplexu Virginíd

Meteorických rojov prislúchajúcich ku komplexu Virginíd je viac, avšak my sa budeme okrem tých vyššie spomenutých podrobnejšie venovať ešte dvom relatívne nedávno objaveným rojom, ktoré zatiaľ nie sú oficiálne potvrdené.

Jedným z týchto rojov sú  $\kappa$ -Virginidy (KVI), ktoré objavil Šegon a kol. (2013). Tento roj je aktívny od začiatku marca do polovice apríla. Jeho radiant je značne rozptýlený na oblohe s deklináciou v rozmedzí 1° až  $-15^\circ$  a rektascenziou v intervale 185° až 225°. Podobne sa aj obežné dráhy meteoroidov tohto roja značne líšia od strednej dráhy. Zároveň sa roj vyznačuje dlhou dobou aktivity. Veľký rozptyl radiantu a dlhá doba aktivity by mohli nasvedčovať tomu, že sa jedná o starý meteorický roj.

Ďalším rojom so slabou aktivitou sú 68 Virginidy (OAV), ktoré objavil Jenniskens a kol. (2016b). Meteory sa pohybujú na orbite typickej pre kométy Jupiterovej rodiny a materské teleso nie je známe.

Pre úplnosť už len vymenujme niektoré meteorické roje, ktorým sa budeme v poslednej kapitole venovať a ktoré taktiež patria medzi nepotvrdené roje. Sú to severné marcové Virginidy (NVI),  $\lambda$ -Virginidy (LVI),  $\mu$ -Virginidy (DLI), severné  $\gamma$ -Virginidy (NGV) a južné  $\gamma$ -Virginidy (SGV).

## 2.2 Iné ekliptikálne roje

Pri analýze komplexu Virginíd musíme brať do úvahy aj ostatné meteorické roje vyznačujúce sa malým sklonom ich obežnej dráhy. Ide najmä o meteorické roje s radiantom v súhvezdí Leva a sú to napríklad južné a severné  $\delta$ -Leonidy, februárové  $\pi$ -Leonidy alebo  $\lambda$ -Leonidy.

Z IAU Meteor Data Center boli opäť prevzaté polohy geocentrických radiantov jednotlivých rojov (Tabuľka 2.3) a hodnoty ich orbitálnych elementov (Tabuľka 2.4).

### 2.2.1 $\delta$ -Leonidy

Meteorický roj  $\delta$ -Leoníd sa vyznačuje aktivitou vo februári a pomerne rozptýleným radiantom. Delíme ich na severné (NDL) a južné (SDL). Potenciálnym materským telesom je asteroid 4450 Pan (1987 SY), avšak pravdepodobnejším rodičom tohto roja je teleso 1999 RD<sub>32</sub>. So 46% pravdepodobnosťou sa jedná o vyhasnuté kometárne jadro (Jenniskens, 2006, kapitola 28).

### 2.2.2 Ďalšie roje

Spomeňme ešte  $\lambda$ -Leonidy (LAL), ktoré objavil Jenniskens a kol. (2016b) len pomerne nedávno. Malo by sa jednať o roj typu Jupiterovej rodiny. Podobne

Tabuľka 2.3: Poloha geocentrického radiantu a geocentrické rýchlosti pre vybrané ekliptikálne meteorické roje. Zdroj: IAU Meteor Data Center.

No.	Názov roja	Kód	$\alpha$ [°]	$\delta$ [°]	$d\alpha$	$d\delta$	$v$ [km.s <sup>-1</sup> ]	Pozn.
733	$\lambda$ -Leo	LAL	144,8	23,8	1,02	-0,33	15,6	J16b
113	J. $\delta$ -Leo	SDL	148,6	18,6	—	—	17,3	J06
			137,7	17,8	—	—	17,4	T89
			136,1	7,2	—	—	20,9	Se76
501	Feb. $\pi$ -Leo	FPL	147,8	9,0	—	—	28,3	RJ
891	Feb. $\sigma$ -Leo	FSL	172,8	5,7	—	—	31,8	J18
272	Apr. $\alpha$ -Coma B.	ACO	193,1	22,9	—	—	16,7	PG

*Pozn.:* Se76: Sekanina (1976), RJ: Rudawska a Jenniskens (2014),

J18: Jenniskens a kol. (2018).

Tabuľka 2.4: Orbitálne elementy pre vybrané ekliptikálne meteorické roje. Zdroj: IAU Meteor Data Center.

Kód	$\lambda_{\odot}$ [°]	$a$ [au]	$q$ [au]	$e$	$\omega$ [°]	$\Omega$ [°]	$I$ [°]	Pozn.
LAL	340,0	2,64	0,829	0,683	233,1	340,2	4,0	J16b
SDL	334,7	1,95	0,804	0,588	237,2	334,7	9,8	J06
	326,4	2,18	0,729	0,666	69,0	146,4	4,3	T89
	314,7	2,47	0,702	0,709	91,3	134,5	6,4	Se76
FPL	317,3	2,27	0,388	0,829	110,0	137,3	4,1	RJ
FSL	337,0	2,41	0,294	0,878	300,3	337,0	3,4	J18
ACO	17,8	2,68	0,839	0,687	232,5	22,1	11,9	PG

novými rojmi sú aj februárové  $\sigma$ -Leonidy (FSL), ktoré boli objavené v roku 2018 a februárové  $\pi$ -Leonidy (FPL), ktorých objav bol učený v roku 2014. Okrem rojov v súhvezdí Leva ešte spomeňme aprílové  $\alpha$ -Coma Berenicidy (ACO) s radiantom v súhvezdí Vlasov Bereniky.

# 3. Postup a výsledky merania

## 3.1 Postup merania

### 3.1.1 Európska bolidová sieť

O počiatkoch Európskej bolidovej siete môžeme hovoriť už v roku 1951, keď boli v Ondřejove uskutočnené prvé fotografické pozorovania meteorov na základe iniciatívy Zdeňka Ceplechu. Kľúčovým momentom bolo vyfotografovanie veľmi jasného bolidu v roku 1959. Zo snímok bolo určené miesto dopadu a boli nájdené aj úlomky tohto meteoritu v oblasti okolo mesta Příbram. Išlo o prvý prípad na svete, kedy sa na základe pozorovania a výpočtov dráhy podarilo nájsť aj miesto dopadu a samotný meteorit. Tento obrovský úspech viedol k ďalšiemu rozvoju meteorickej astronómie a už v roku 1963 bola založená menšia pozorovacia sieť monitorujúca nočnú oblohu na území vtedajšieho Československa. (Oberst a kol., 1998). V súčasnosti má Európska bolidová sieť stanice na území Česka, Slovenska, Rakúska, Nemecka a Holandska.

### 3.1.2 Spracovanie fotografií

Meranie prebieha pomocou kamier s fisheye objektívom snímajúcim celú oblohu. Každá snímka je vytvorená 35-sekundovou expozíciou a každá stanica disponuje dvomi kamerami, keďže je potrebné predísť nezachyteniu nejakého meteoru počas zápisu do pamäte. Pri meraní dochádza k periodickému zatieneniu obrazu s frekvenciou 16 Hz, čo rozdelí stopu meteoru na úseky a na základe toho určujeme rýchlosť meteoroidu v atmosfére.

Samotné spracovanie snímok prebieha v programe Fishscan. Prvým krokom je zmeranie pozícií viditeľných hviezd, čo nám umožní presne zmerať polohu pozorovaného meteoru. V ideálnom prípade zmeriame hviezdy po celej oblohe, avšak oblačnosť to môže značne skomplikovať. Po kalibrácii môžeme postúpiť k meraniu meteoru, pri ktorom určíme polohu meteoru na oblohe a taktiež polohy jednotlivých úsekov.

Pre určenie svetelnej krivky meteoru musíme najskôr určiť fotometriu hviezd, ktorá v programe prebieha automaticky a výsledkom je charakteristická krivka. Potom môžeme prejsť k meraniu jasnosti samotného bolidu prechádzaním po jednotlivých úsekoch stopy a stmavnutie jednotlivých pixelov sa prevedie na signál.

### 3.1.3 Výpočet heliocentrickej dráhy

Po zmeraní snímok sa skombinujú dáta z viacerých staníc pre jeden daný bolid a ďalšie spracovanie prebieha v programe Boltrack. To je tvorené z doladenia astrometrie, výpočtu trajektórie, rýchlosti a spracovania svetelnej krivky, pričom výsledkom je určenie heliocentrickej dráhy a odhady fyzikálnych vlastností.

Prvým krokom je astrometria, v rámci ktorej vylúčime niektoré nepresne určené hviezdy a zvolíme vhodnú redukciu. Vždy je vhodné skontrolovať, či sú chyby určenia polôh hviezd v okolí pozorovaného meteoru v náhodných smeroch. Ak by sa totiž všetky namerané hviezdy líšili od katalogizovaných v jednom smere, tak by mohlo dôjsť k vzniku systematickej chyby.



Následne môžeme prejsť k spracovaniu nameraných polôh meteoru. V ideálnom prípade by všetky body ležali na priamke a teda body, ktoré sa značne vymykajú tomuto trendu môžeme vylúčiť. Kritické bývajú body namerané na začiatku a konci stopy meteoru, kde býva stopa slabá a meranie môže byť do značnej miery subjektívne.

Pri vyhodnocovaní rýchlosti sa môžeme stretnúť s veľkou škálou situácií. Cieľom je nafitovať namerané body vhodnou závislosťou a naskytuje sa fyzikálny, parabolický, lineárny, či lineárno-parabolický model. Opäť máme možnosť vylúčiť nepresne namerané body, ktoré sa vymykajú nami predpokladanej závislosti.

Pri určovaní fotometrie vylúčime nepresnejšie určené hviezdy, ktorých jasnosť je väčšia ako 4 mag a rovnako aj tie veľmi jasné, ktoré môžu byť presaturované. Hviezdy okolo druhej a tretej magnitúdy sú smerodajné aj pri výpočte tzv. extinkčného koeficientu, ktorý predstavuje mieru toho, ako veľmi dochádza k útlmu prichádzajúceho svetla pri prechode atmosférou.

Dôležitou vlastnosťou pozorovaného meteoru je jeho jasnosť, ako sa mení počas prechodu atmosférou alebo či prípadne došlo k výbuchu. Z kamier nedosiahneme veľkú citlivosť na zmeny jasnosti a preto je vhodné použitie rádiometrov. Svetelnú krivku potom vieme nakalibrovať na základe meraní z kamier. Na základe množstva prichádzajúceho signálu a využitia svetelnej účinnosti potom vieme odhadnúť aj hmotnosť meteoroidu, pričom takáto hmotnosť má prívlastok fotometrická.

Po odhade fyzikálnych parametrov môžeme pristúpiť k fitovaniu počiatkovej rýchlosti, prípadne môžeme ešte spraviť korekciu na zakrivenú dráhu meteoru vplyvom gravitácie. Nasleduje samotný výpočet heliocentrickej dráhy a na záver už potom zostáva len porovnanie elementov dráhy bolidu so známymi meteorickými rojmi.

## 3.2 Výsledky merania

Pre účely vyhodnotenia bolo celkovo vybraných 272 meteorov od roku 2016 do roku 2020. Jedná sa o meteory, pri ktorých je slnečná dĺžka  $\lambda_{\odot}$  v rozmedzí  $310^{\circ}$  až  $35^{\circ}$ . K tomu bolo pridaných ďalších 11 bolidov z roku 2021, o ktorých bola predpokladaná príslušnosť ku komplexu Virginíd. Z celkového počtu nameraných meteorov, autor práce samostatne zmeral 7 bolidov v programe Fishscan a vypočítal dráhy pre 75 bolidov v programe Boltrack.

Pri triedení boli najskôr odstránené meteory s veľkým sklonom obežnej dráhy, t. j.  $I > 15^{\circ}$  a zároveň tie s hlavnou polosou  $a > 5$  au. Zároveň nás zaujíma oblasť v okolí súhvezdia Panna a omedzili sme sa na oblasť, ktorej rektascenzia  $\alpha$  je v rozmedzí  $80^{\circ}$  a  $250^{\circ}$ , a deklinácia v rozmedzí  $-30^{\circ}$  a  $50^{\circ}$ . Po uplatnení týchto podmienok sme dostali 158 meteorov pre ďalšie spracovanie. Následne boli tieto meteory porovnávané s parametrami meteorických rojov uvedených v databáze IAU Meteor Data Center a potom boli pre kandidátov určené hodnoty  $D_{SH}$  a  $D_D$  kritérií, pričom sme požadovali  $D_{SH} < 0,20$  a  $D_D < 0,10$ . Boli pripustené aj isté výnimky, ktoré budú neskôr diskutované.

Jednou z metód, ako môžeme z dát vyťažiť nejaké informácie o prítomných meteorických rojov, je vynesenie závislosti deklinácie  $\delta$  na rektascenzii  $\alpha$  a miesta s väčšou koncentráciou bodov môžu poukazovať na prítomnosť meteorického roja

(Obr 3.1). Zároveň je potrebné porovnávať aj geocentrické rýchlosti jednotlivých meteorov.

Zmerané polohy radiantov a geocentrické rýchlosti boli porovnávané s hodnotami uvedenými v databáze IAU Meteor Data Center. Na základe toho sa nám podarilo určiť alebo aspoň odhadnúť rojovú príslušnosť pre 44 meteorov (pozri Prílohu A pre všetky zmerané parametre týchto meteorov). Z nameraných dát boli vypočítané stredné hodnoty polohy radiantu (Tabuľka 3.1) a orbitálnych elementov (Tabuľka 3.2) pre meteorické roje disponujúce väčším počtom zmeraných meteorov (štyri meteory a viac). Chyba stredných hodnôt je uvedená ako štandardná chyba aritmetického priemeru.

### 3.2.1 $\eta$ -Virginidy

Najviac meteorov sa nám podarilo spojiť s  $\eta$ -Virginidami a to celkovo 10. Všetky tieto meteory spĺňajú požiadavku na  $D_{SH}$  a  $D_D$  kritériá pri porovnaní s hodnotami, ktoré publikoval Jenniskens a kol. (2016a). Slnecná dĺžka  $\lambda_{\odot}$  je pre všetky meteory v intervale  $345^{\circ}$ - $3^{\circ}$ . Boli určené distribúcie ich geocentrických radiantov (Obr 3.2). Posun radiantu v závislosti na slnečnej dĺžke (Obr 3.3) je veľmi dobre definovaný a bol určený pomocou lineárnej regresie s výsledkom

$$\alpha = 183,1 + 0,93(\lambda_{\odot} - 354,8),$$

$$\delta = 4,5 - 0,34(\lambda_{\odot} - 354,8).$$

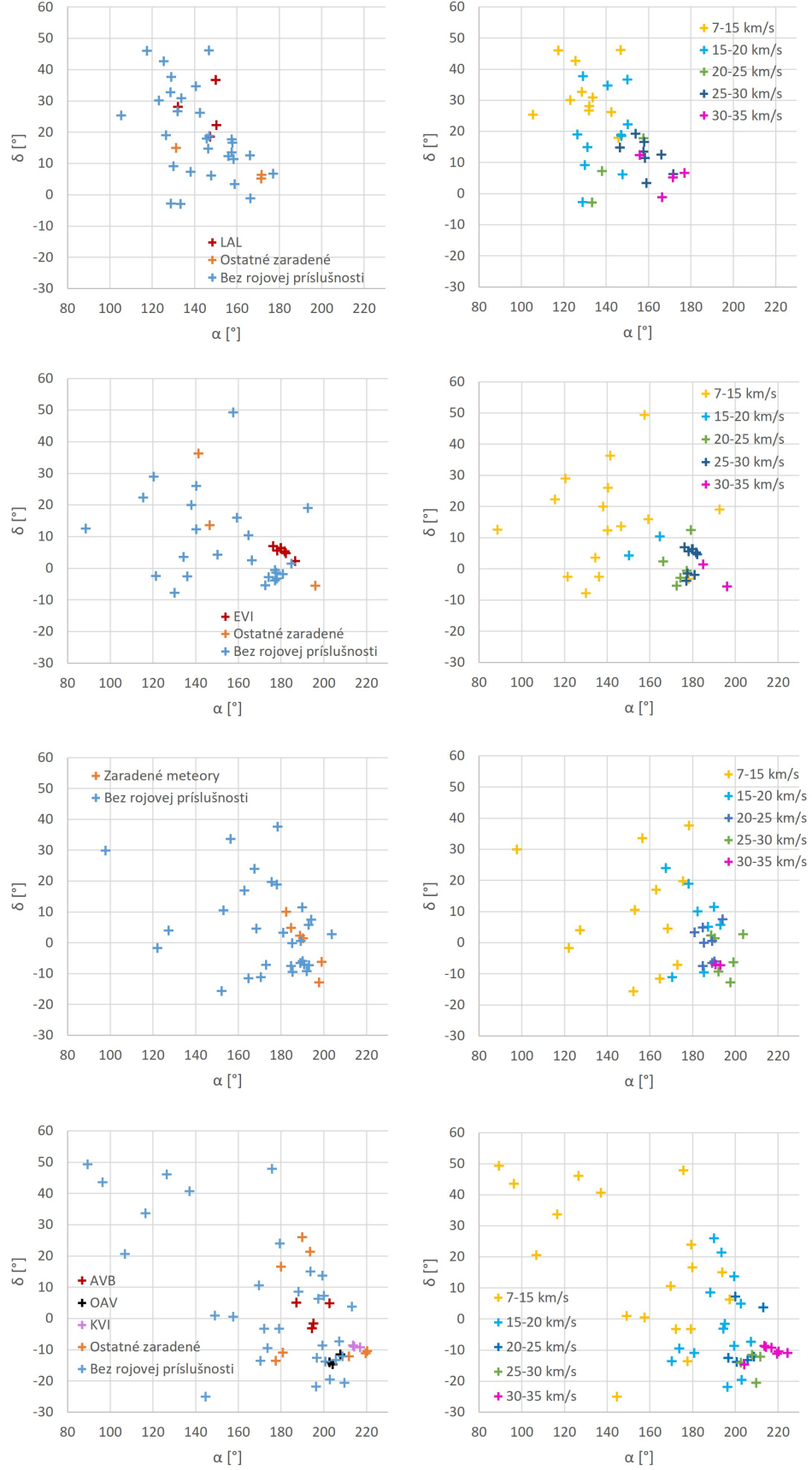
Pre porovnanie boli stiahnuté aj polohy geocentrických radiantov z databázy CAMS<sup>1</sup> z rokov 2010 až 2016, odkiaľ je vidieť, že rozptyl našich dát je menší ako pri dátach z CAMS.

Čo sa týka fyzikálnych parametrov, tak všetky meteory okrem jedného boli klasifikované ako typ I a I/II. Jeden meteor s magnitúdou  $-3.5$  bol klasifikovaný ako IIIA. Keďže sa ale jedná o menej jasný meteor, tak určenie triedy pomocou  $P_E$  parametra nemusí byť spoľahlivé. Najjasnejší bolid mal jasnosť  $-10,9$  mag a jeho počiatočná fotometrická hmotnosť bola odhadnutá na približne 700 g. Tisserandov parameter  $T_J$  je pre všetky merania v rozmedzí 2,5 až 3, čo by odpovedalo kométam Jupiterovej rodiny.

Výsledky nášho merania sa najlepšie zhodujú s výsledkami, ktoré publikoval Jenniskens a kol. (2016a). Pri porovnaní stredných dráh dostávame pre oba kritériá hodnotu 0,01. Druhá najlepšia zhoda je s výsledkami, ktoré udáva Shiba (2018). Väčší rozdiel je len v určení deklinácie radiantu a jeho posunu. Geocentrická rýchlosť je u oboch autorov takmer rovnaká a je veľmi podobná nášmu výsledku. Je potrebné podotknúť, že Shiba (2018) udáva výsledky rozdelené na štyri fázy podľa štvorročnej periódy aktivity. Naše dáta boli porovnávané s výsledkami odpovedajúcimi obdobiu maxima aktivity, keďže väčšina nami zmeraných bolidov odpovedá práve tomuto obdobiu. Aj napriek malému štatistickému súboru je z našich dát patrná aj štvorročná perióda aktivity, keďže až polovica všetkých bolidov bola z roku 2021. Rok 2021 by mal teda odpovedať maximu aktivity, presne ako vyplýva z práce Shiba (2018).

---

<sup>1</sup><http://cams.seti.org>



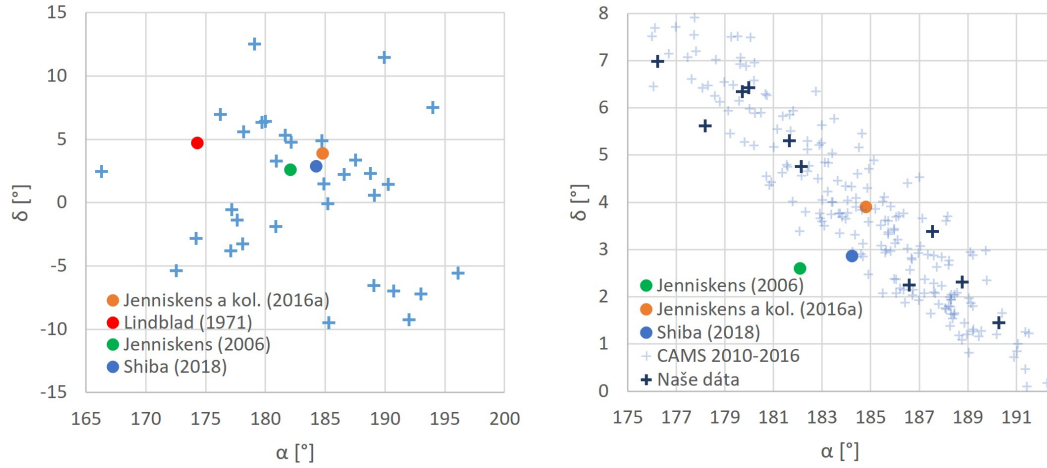
Obr. 3.1: Distribúcie geocentrických radiantov s vyznačenými príslušnosťami (vľavo) a rýchlosťami (vpravo) pre slnečnú dĺžku  $\lambda_{\odot}$  v intervaloch 310°-340°, 340°-360°, 0°-15° a 15°-35° (zoradené zhora nadol).

Tabuľka 3.1: Stredná poloha geocentrického radiantu a rýchlosti pre vybrané meteorické roje z komplexu Virginíd.

Roj	$\lambda_{\odot}$ [°]	$\alpha$ [°]	$\delta$ [°]	$d\alpha$	$d\delta$	$v$ [km.s <sup>-1</sup> ]	Počet
EVI	354,8	183,1 ± 1,5	4,5 ± 0,6	0,93 ± 0,11	-0,34 ± 0,07	27,1 ± 0,3	10
AVB	22,3	192,3 ± 3,5	3,1 ± 2,5	0,81 ± 0,18	-0,43 ± 0,24	17,9 ± 0,7	5
OAV	16,7	202,3 ± 1,8	-11,8 ± 1,5	0,80 ± 0,21	-0,35 ± 0,37	28,5 ± 0,5	5
KVI	12,7	210,2 ± 4,8	-8,1 ± 0,9	1,04 ± 0,03	-0,19 ± 0,01	34,5 ± 0,4	4
LAL	339,7	144,6 ± 2,8	25,9 ± 3,9	---	---	15,1 ± 0,9	6

Tabuľka 3.2: Stredné orbitálne elementy pre vybrané meteorické roje z komplexu Virginíd.

Roj	$a$ [au]	$e$	$q$ [au]	$I$ [°]	$\omega$ [°]	$\Omega$ [°]
EVI	2,50 ± 0,02	0,820 ± 0,005	0,451 ± 0,011	5,3 ± 0,1	282,4 ± 1,2	354,8 ± 1,6
AVB	2,49 ± 0,14	0,693 ± 0,020	0,752 ± 0,013	4,2 ± 1,1	247,0 ± 1,6	22,3 ± 4,1
OAV	2,55 ± 0,03	0,841 ± 0,007	0,406 ± 0,015	2,7 ± 1,5	107,6 ± 1,6	196,6 ± 2,0
KVI	2,41 ± 0,14	0,909 ± 0,007	0,217 ± 0,004	6,9 ± 1,6	310,1 ± 0,5	12,7 ± 4,6
LAL	2,48 ± 0,12	0,662 ± 0,015	0,832 ± 0,027	4,9 ± 1,6	232,6 ± 4,9	339,7 ± 3,1



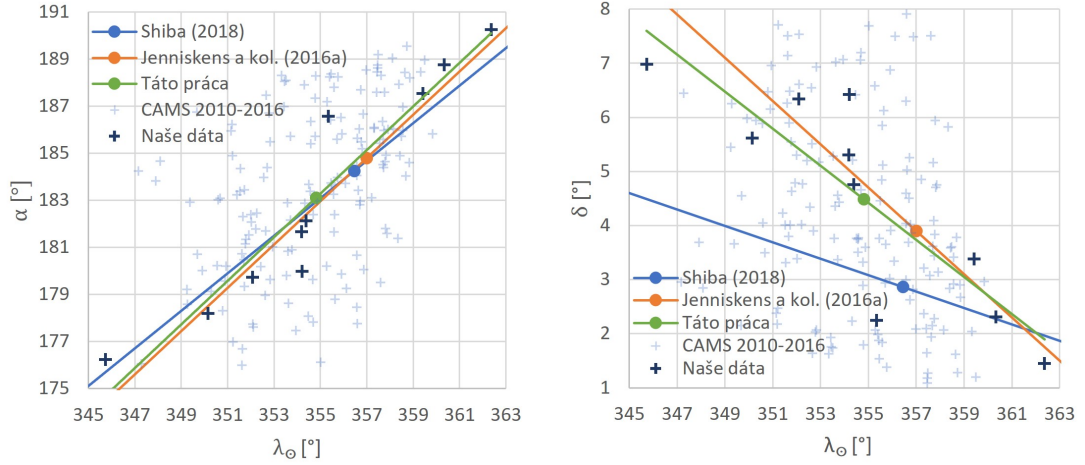
Obr. 3.2: Rozdelenie radiantov v okolí katalogizovanej hodnoty pre všetky zmerané meteory so slnečnou dĺžkou  $\lambda_{\odot}$  medzi 340° a 10° (vľavo) a rozdelenie radiantov pre meteory patriace  $\eta$ -Virginidám (vpravo).

### 3.2.2 $\alpha$ -Virginidy

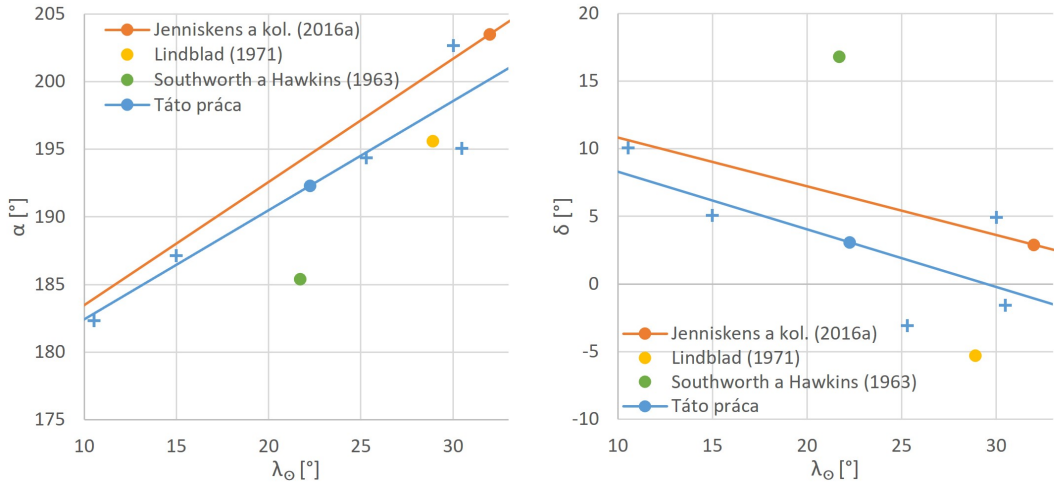
Nameraných bolo celkovo 5 meteorov, ktoré by potenciálne mohli patriť k  $\alpha$ -Virginidám. Slnečné dĺžky týchto meteorov sú v rozmedzí 10° a 30°. Jedná sa o roj, ktorý má maximum aktivity ku koncu nášho skúmaného obdobia a teda pre relevantnejšie informácie o strednej dráhe by bolo potrebné predĺžiť skúmané obdobie.

Namerané dáta vykazovali dostatočnú závislosť na použitie lineárnej regresie, z ktorej boli určené hodnoty posunu rektascenzie a deklinácie radiantu v závislosti na slnečnej dĺžke (Obr. 3.4) s výsledkom

$$\alpha = 192,3 + 0,81(\lambda_{\odot} - 22,3),$$



Obr. 3.3: Určenie posunu rektascenzie (vľavo) a deklinácie (vpravo) v závislosti od slnečnej dĺžky pre  $\eta$ -Virginidy.



Obr. 3.4: Závislosti rektascenzie (vľavo) a deklinácie geocentrického radiantu (vpravo) na slnečnej dĺžke pre  $\alpha$ -Virginidy.

$$\delta = 3,1 - 0,43(\lambda_{\odot} - 22,3).$$

Geocentrické rýchlosti sú v rozmedzí 17,0 až 19,7 km.s<sup>-1</sup>.

Meteory boli typu od II do IIIB. Išlo zväčša o málo jasné meteory s magnitúdou okolo  $-2$ , čo mohlo spôsobiť rôznorodé výsledky typového zaradenia. Najjasnejší bolid s magnitúdou  $-8,4$  bol typu II a jeho počiatková fotometrická hmotnosť bola odhadnutá na takmer 250 g. Ostatným meteorom bola priradená hmotnosť aspoň o dva rády menšia.

Najlepšia zhoda našich dát je s výsledkami, ktoré udávajú Jenniskens a kol. (2016c) a Lindblad (1971). Pri porovnaní našej strednej dráhy s dráhami týchto autorov dostávame hodnoty kritérií  $D_{SH} = 0,11$  (Jenniskens a kol., 2016a),  $D_{SH} = 0,12$  (Lindblad, 1971) a  $D_D = 0,04$  (pre oboch autorov).

### 3.2.3 68 Virginidy

K tomuto nepotvrdenému meteorickému roju bolo priradených 5 meteorov so slnečnou dĺžkou  $11^\circ$  až  $23^\circ$ . Opäť boli pomocou lineárnej regresie určené hodnoty posunu rektascenzie a deklinácie radiantu v závislosti na slnečnej dĺžke (Obr. 3.5) s výsledkom

$$\alpha = 202,3 + 0,80(\lambda_\odot - 16,7),$$

$$\delta = -11,8 - 0,35(\lambda_\odot - 16,7).$$

Deklinácie prvého a posledného bolidu veľmi nezapadajú do predpokladaného trendu, ale  $D$  kritériá vyšli dostatočne nízke. Geocentrické rýchlosti boli určené v rozmedzí  $27,4$  a  $30,3 \text{ km.s}^{-1}$ .

Meteory sa vyznačovali jasnosťou od  $-1,8$  do  $-5,2$  mag a ich  $P_E$  parametre spadajú do typov I a II. Všetkým bolidom bola priradená aj podobná počiatočná fotometrická hmotnosť niekoľkých gramov, prípadne desiatín gramu.

Keďže sa jedná len o nedávno objavený roj, tak výsledky môžeme porovnávať len s jedným autorom. Naše výsledky sú ale v súlade s parametrami, ktoré určil Jenniskens a kol. (2016b) a porovnaním stredných dráh dostávame pre  $D$  kritériá hodnoty  $D_{SH} = 0,06$  a  $D_D = 0,03$ .

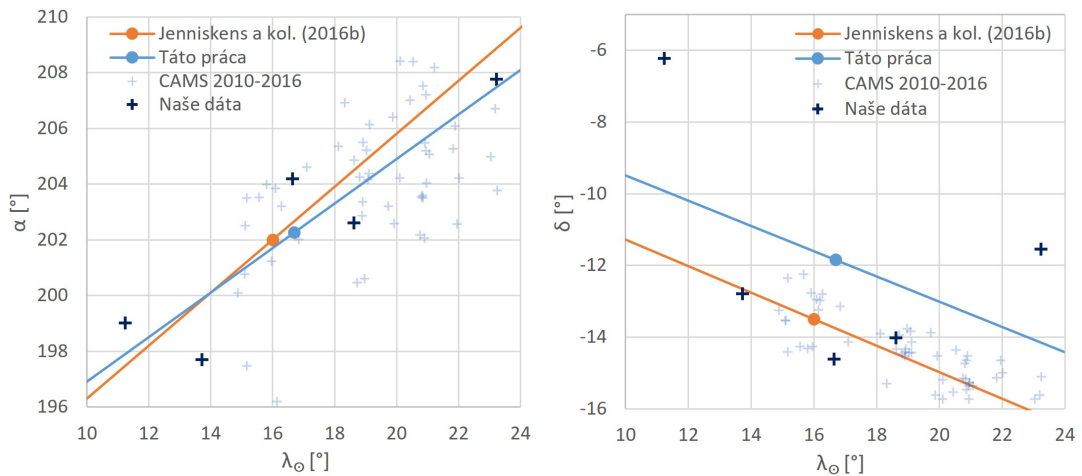
### 3.2.4 $\kappa$ -Virginidy

K tomuto meteorickému roju boli priradené 4 bolidy so slnečnými dĺžkami  $359^\circ$  až  $19^\circ$ , avšak ich príslušnosť k tomuto roju nie je celkom jednoznačná. Lineárnou regresiou (Obr. 3.6) sme znova určili posun geocentrického radiantu v závislosti na slnečnej dĺžke s výsledkom

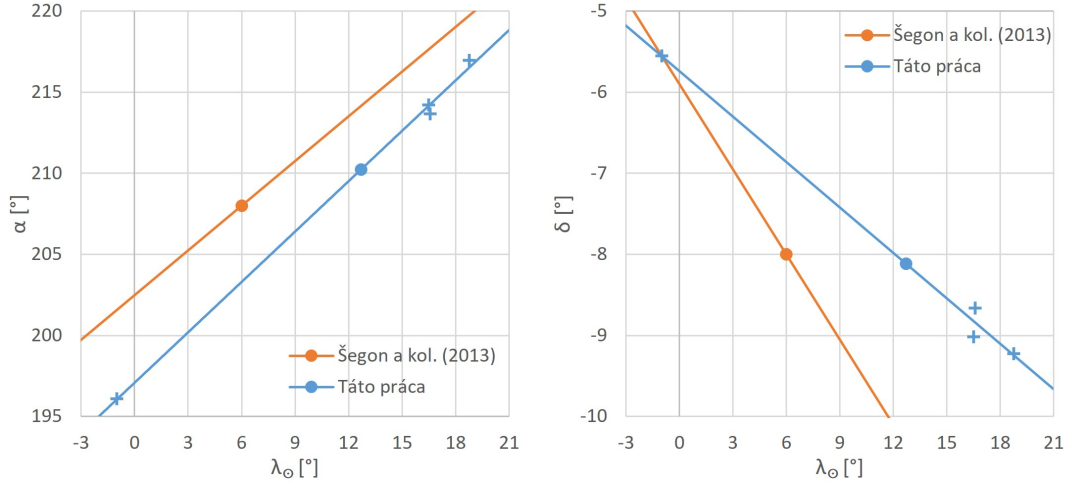
$$\alpha = 210,2 + 1,04(\lambda_\odot - 12,7),$$

$$\delta = -8,1 - 0,19(\lambda_\odot - 12,7).$$

Naše dáta ale nie sú ideálne, keďže práve v oblasti očakávaného maxima neboli zaznamenané žiadne bolidy.



Obr. 3.5: Závislosti rektascenzie (vľavo) a deklinácie geocentrického radiantu (vpravo) na slnečnej dĺžke pre 68 Virginidy.



Obr. 3.6: Závislosti rektascenzie (vľavo) a deklinácie geocentrického radiantu (vpravo) na slnečnej dĺžke pre  $\kappa$ -Virginidy.

Magnitúdy všetkých meteorov sú v rozmedzí  $-2$  a  $-4$  magnitúdy a jednalo sa o malé telesá s fotometrickou hmotnosťou niekoľko desiatín gramu. Všetky bolidy boli typu I a II.

Zároveň majú všetky meteory  $D_{SH} < 0,20$  pri porovnaní s katalógovou hodnotou (Šegon a kol., 2013). Avšak hodnoty  $D_D$  kritéria presahujú  $0,20$  a to kvôli väčšiemu rozdielu perihéliových vzdialeností. Ide o príklad toho, prečo je dôležité používať viacero kritérií pre určenie príslušnosti k roju. Napriek tomu boli meteory k tomuto roju zaradené, keďže v práci Šegon a kol. (2013) bol prezentovaný značný rozptyl geocentrického radiantu a rýchlostí, do ktorého naše merania zapadajú. Naše dáta teda naznačujú, že niektoré parametre strednej dráhy (obzvlášť perihéliová vzdialenosť) môžu byť iné, ako udáva Šegon a kol. (2013). Je taktiež možné, že došlo k detekcii nejakej kompaktnejšej štruktúry v rámci tohto roja.

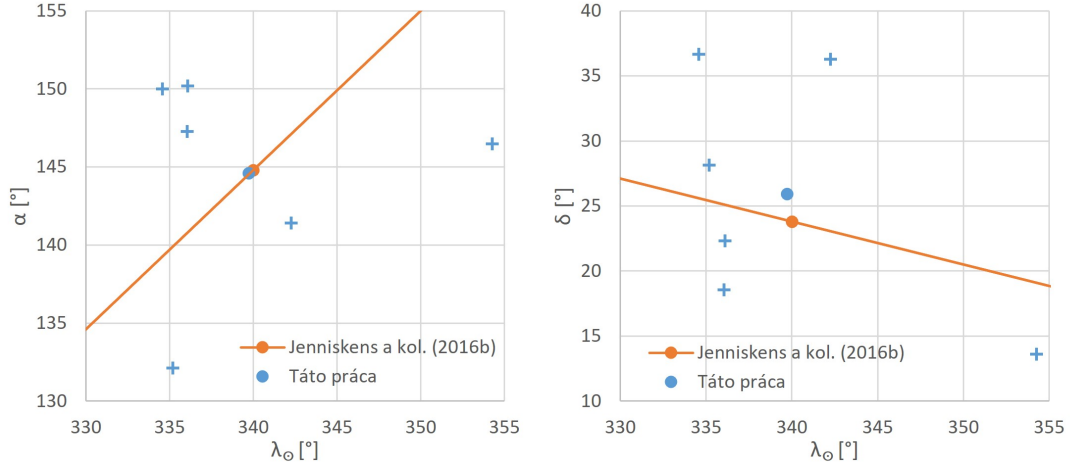
### 3.2.5 $\lambda$ -Leonidy

Celkovo bolo k tomuto meteorickému roju priradených 6 bolidov so slnečnou dĺžkou v rozsahu  $334^\circ$  až  $354^\circ$ . Určené polohy geocentrických radiantov a rýchlostí ale vykazujú značný rozptyl (Obr. 3.7) a preto nie je vhodné použitie lineárnej regresie na výpočet posunu radiantu.

Jedná sa o bolidy prevažne typu II, ale aj I. Ich jasnosti sú v rozmedzí od  $-1,5$  až do  $-9,2$  mag. Podobne aj ich počiatočné fotometrické hmotnosti sa značne líšia od  $0,6$  g pre najľahší až do takmer  $450$  g pre ten najhmotnejší.

Aj napriek rôznorodosti jednotlivých bolidov dostávame strednú dráhu veľmi podobnú tej katalógovej (Jenniskens a kol., 2016b) s kritériami  $D_{SH} = 0,03$  a  $D_D = 0,02$ .





Obr. 3.7: Závislosti rektascenzie (vľavo) a deklinácie geocentrického radiantu (vpravo) na slnečnej dĺžke pre  $\lambda$ -Leonidy.

### 3.2.6 Ostatné roje

Pre všetky ďalšie meteorické roje máme už len malý počet kandidátov (3 a menej), čo nie je dostatočné na robenie zásadných záverov.

Ku koncu nami skúmaného obdobia v roku 2020 boli pozorované 3 bolidy s veľmi podobnými parametrami (Tabuľka 3.3 a Tabuľka 3.4). Jeden z nich dokonca dosahoval jasnosť až  $-11,1$  mag a počiatočná hmotnosť bola odhadnutá na takmer 250 g. Aj keď je veľmi pravdepodobné, že tieto tri pozorované telesá boli rovnakého pôvodu, tak určenie príslušnosti k roju nie je zrejmé. Mohlo by sa jednať o meteority z roja  $\mu$ -Virginíd, avšak  $D$  kritériá nedávajú jednoznačnú odpoveď. Od katalógovej hodnoty (Porubcan a Gavajdova, 1994) sa zmerané bolidy najviac líšia v perihéliovej vzdialenosti, čo znova spôsobuje vyššiu hodnotu  $D_D$ .

Tabuľka 3.3: Geocentrické radianty a rýchlosti pre tri blízke meteority potenciálne patriace  $\mu$ -Virginidám.

Kód meteoru	$\lambda_{\odot}$ [°]	$\alpha$ [°]	$\delta$ [°]	$v$ [km.s <sup>-1</sup> ]
EN150420_232433	26,2	219,5	-11,1	32,5
EN170420_001619	27,2	220,3	-10,4	31,6
EN220420_232942	33,0	224,4	-11,0	30,7

Tabuľka 3.4: Elementy heliocentrickej dráhy pre tri blízke meteority potenciálne patriace  $\mu$ -Virginidám.

Kód meteoru	$a$ [au]	$q$ [au]	$e$	$\omega$ [°]	$\Omega$ [°]	$I$ [°]
EN150420_232433	2,58	0,282	0,891	301,7	26,2	6,1
EN170420_001619	2,42	0,299	0,876	300,2	27,2	7,2
EN220420_232942	2,49	0,334	0,866	296,0	33,0	7,4



kritéria. Mohlo by sa jednať aj o neobjavený roj, ale počet troch bolidov nie je dostatočný, aby sme to mohli tvrdiť a sú potrebné ďalšie dáta.

Pre aprílové  $\alpha$ -Coma Berenicidy boli určené dva meteory s pomerne dobrou zhodou s katalógovou hodnotou (Porubcan a Gavajdova, 1994). Pre jeden z nich dokonca kritériá dosahujú hodnoty  $D_{SH} = 0,02$  a  $D_D = 0,01$ .

K februárovým  $\sigma$ -Leonidám boli priradené dva bolidy, pričom jeden z nich bol veľmi jasný s magnitúdou až  $-12,4$  a odhadovanou hmotnosťou 3,9 kg.

Po dva bolidy boli priradené aj južným  $\gamma$ -Virginidám, z toho jeden mimoriadne jasný s magnitúdou  $-12,5$  a počiatočnou fotometrickou hmotnosťou odhadnutou až na 70 kg.

Pre južné  $\delta$ -Leonidy sme určili jeden meteor, ktorý by mohol patriť k tomuto roju a najlepšia zhoda je s výsledkom publikovaným v práci Terentjeva (1989). Jeden bolid bol priradený aj severným marcovým Virginidám, severným  $\gamma$ -Virginidám, februárovým  $\pi$ -Leonidám a  $\lambda$ -Virginidám. Vzhľadom k malému počtu zaznamenaných meteorov môžu byť tieto zaradenia len náhodné zhody a existenciu týchto meteorických rojov nie je momentálne možné potvrdiť.

### 3.3 Diskusia

Celkovo sa nám podarilo zaznamenať meteory potenciálne patriace k 14 rôznym ekliptikálnym meteorickým rojom, ktoré sú pozorovateľné v jarnom období. Najväčšie množstvo dát bolo získané pre roj  $\eta$ -Virginíd. Už na prvý pohľad je vidieť lineárnu závislosť rektascenzie a deklinácie radiantu na slnečnej dĺžke (Obr. 3.3). Presnosť nameraných dát potvrdzuje fakt, že len 10 bolidov postačuje na dosiahnutie výsledkov, ktoré sú porovnateľné s automatizovanými meraniami stoviek meteorov (pozri dáta z CAMS na Obr. 3.2 a Obr. 3.3). Ide o dobre definovaný roj a všetky vybrané meteory by k nemu skutočne mali patriť. Taktiež sa nám podarilo získať dáta, ktorá nasvedčujú štvorročnej perióde aktivity tohto roja. Čo sa týka fyzikálnych vlastností, tak meteoroidy sú z pevného materiálu, ktorý odpovedá skôr planétke ako kométe. O vysokej pevnosti materiálu môžeme hovoriť aj vďaka viacerým veľmi jasným bolidom z tohto roja, ktoré jednoznačne patria do typu I. Babadzhanov a kol. (2015) ale hovorí o materskom telese tohto roja ako o telese kometárneho pôvodu. Naše výsledky nenasvedčujú tomu, že meteoroidy tohto roja sú z mäkkého materiálu typického pre kométy.

U všetkých ďalších rojov už bol počet zmeraných meteorov menší, no napriek tomu sa nám podarilo určiť stredné parametre dráh porovnateľné s tými katalógovými a to obzvlášť pre  $\lambda$ -Leonidy a 68 Virginidy. Ani jeden z týchto dvoch rojov nie je oficiálne uznaný IAU, no z našich dát sme dostali jasné dôkazy o ich existencii. Naše dáta ale môžu nie len potvrdiť, ale aj upresniť niektoré výsledky z CAMS a iných automatizovaných prehliadok oblohy. Napríklad pri  $\kappa$ -Virginidách došlo k spresneniu určenia perihéliovej vzdialenosti, za predpokladu, že všetky meteory k roju skutočne patria. Pre  $\lambda$ ,  $\kappa$  a 68 Virginidy sme určili typové zaradenie medzi I a II, takže sa jedná o relatívne pevný materiál. Pre  $\alpha$ -Virginidy to už nie je také jednoznačné, keďže typové zaradenie meteorov tohto roja je dosť rôznorodé. Najjasnejšie bolidy ale boli typu II a bude sa pravdepodobne jednať o mäkkší materiál ako pri  $\eta$ -Virginidách.

U ďalších rojov už nedisponujeme dostatočným množstvom dát, každopádne ale môžu vypovedať o existencii daných rojov. Kvôli nízkej aktivite bude potrebné

zbierať dáta podstatne dlhšiu dobu pre ich oficiálne potvrdenie. Zaujímavou je trojica bolidov s podobnými dráhami (Tabuľka 3.3 a Tabuľka 3.4), ktoré môžu poukazovať na existenciu nového meteorického roja. Potrebné sú ale ďalšie merania.

V distribúciách radiantov (Obr. 3.1) je vidieť viacero miest s väčšou koncentráciou bodov. Ide ale len o náhodnú koncentráciu, keďže rôzne rýchlosti nenasvedčujú spoločnému pôvodu týchto meteorov.

# Záver

V tejto práci sme si predstavili úvod do relatívne mladej fyziky meteorov, vysvetlili základné pojmy, vznik meteorických rojov, fyzikálne vlastnosti meteoroidov, popis heliocentrickej dráhy a dôležité kritériá pre určenie príslušnosti meteorov k meteorickým rojom. Nadobudnuté znalosti boli využívané v ďalších kapitolách.

Táto práca bola zameraná na ekliptikálne meteorické roje v období od februára do apríla. Jedná sa hlavne o roje patriace do meteorického komplexu Virginíd, pričom väčšina z nich nie je oficiálne uznaná Medzinárodnou astronomickou úniou. Zhrnuli sme základné informácie od autorov, ktorí sa týmito rojmi zaoberali a uviedli sme známe parametre heliocentrických dráh pre vybrané roje.

Posledná časť bola venovaná popisu merania a využitia dát z Európskej bolidovej siete. Nami uskutočnený spôsob merania vedie k veľmi presným výsledkom a často aj malý počet zmeraných bolidov umožní robiť hĺbkovú analýzu celého roja. Pre niektoré roje sa nám podarilo upresniť elementy dráhy a určiť, od ktorých autorov sú výsledky relevantné. Najviac meteorov bolo priradených k  $\eta$ -Virginidám, u ktorých bola zistená vysoká pevnosť materiálu. Okrem toho sme určili nemálo meteorov patriacich k nepotvrdeným rojom, čo by mohlo potvrdzovať ich existenciu a detekovali sme aj meteory, ktoré by mohli vypovedať o existencii nového meteorického roja. Z dát je ale vidieť, že mnohé z nepotvrdených rojov majú veľmi nízku aktivitu a preto je potrebné zhromaždenie väčšieho množstva dát.

# Zoznam použitej literatúry

- BABADZHANOV, P. B., KOKHIROVA, G. I. a OBRUBOV, Y. V. (2015). The potentially hazardous asteroid 2007CA19 as the parent of the  $\eta$ -virginids meteoroid stream. *Astronomy and Astrophysics*, **579**, A119.
- BROŽ, M. (2013). *Fyzika sluneční soustavy*. Matfyzpress, Praha. ISBN 9788073782368.
- CEPLECHA, Z. a MCCROSKY, R. E. (1976). Fireball end heights: A diagnostic for the structure of meteoric material. *Journal of Geophysical Research*, **81** (B35), 6257–6275.
- DRUMMOND, J. D. (1981). A test of comet and meteor shower associations. *Icarus*, **45**(3), 545–553.
- FITZPATRICK, R. (2012). *An Introduction to Celestial Mechanics*. CAMBRIDGE. ISBN 1107023815.
- JENNISKENS, P., NÉNON, Q., ALBERS, J., GURAL, P. S., HABERMAN, B., HOLMAN, D., MORALES, R., GRIGSBY, B. J., SAMUELS, D. a JOHANNINK, C. (2016a). The established meteor showers as observed by cams. *Icarus*, **266**, 331–354.
- JENNISKENS, P., NÉNON, Q., GURAL, P. S., ALBERS, J., HABERMAN, B., JOHNSON, B., MORALES, R., GRIGSBY, B. J., SAMUELS, D. a JOHANNINK, C. (2016b). CAMS newly detected meteor showers and the sporadic background. *Icarus*, **266**, 384–409.
- JENNISKENS, P., NÉNON, Q., GURAL, P. S., ALBERS, J., HABERMAN, B., JOHNSON, B., HOLMAN, D., MORALES, R., GRIGSBY, B. J., SAMUELS, D. a JOHANNINK, C. (2016c). CAMS confirmation of previously reported meteor showers. *Icarus*, **266**, 355–370.
- JENNISKENS, P., BAGGALEY, J., CRUMPTON, I., ALDOUS, P., POKORNY, P., JANCHES, D., GURAL, P. S., SAMUELS, D., ALBERS, J., HOWELL, A., JOHANNINK, C., BREUKERS, M., ODEH, M., MOSKOVITZ, N., COLLISON, J. a GANJU, S. (2018). A survey of southern hemisphere meteor showers. *Planetary and Space Science*, **154**, 21–29.
- JENNISKENS, P. (2006). *Meteor showers and their parent comets*. Cambridge University Press, Cambridge [u.a.]. ISBN 9780521853491.
- KRONK, G. W. (1988). *Meteor showers. A descriptive catalog*.
- LINDBLAD, B. A. (1971). A computerized stream search among 2401 photographic meteor orbits. *Smithsonian Contributions to Astrophysics*, **12**, 14–24.
- OBERST, J., MOLAU, S., HEINLEIN, D., GRITZNER, C., SCHINDLER, M., SPURNY, P., CEPLECHA, Z., RENDTEL, J. a BETLEM, H. (1998). The “european fireball network”: Current status and future prospects. *Meteoritics & Planetary Science*, **33**, 49–56. ISSN 1086-9379.

- PORUBCAN, V. a GAVAJDOVA, M. (1994). A search for fireball streams among photographic meteors. *Planetary and Space Science*, **42**(2), 151–155.
- RUDAWSKA, R. a JENNISKENS, P. (2014). New meteor showers identified in the CAMS and SonotaCo meteoroid orbit surveys. In JOPEK, T. J., RIETMEIJER, F. J. M., WATANABE, J. a WILLIAMS, I. P., editors, *Meteoroids 2013*, pages 217–224.
- RYABOVA, G., ASHER, D. a CAMPBELL-BROWN, M. (2019). *Meteoroids : sources of meteors on Earth and beyond*. Cambridge University Press, Cambridge New York, NY. ISBN 9781108606462.
- SEEDS, M. (2016). *The solar system*. Cengage, San Francisco, CA. ISBN 9781305120761.
- SEKANINA, Z. (1973). Statistical Model of Meteor Streams. III. Stream Search Among 19303 Radio Meteors. *Icarus*, **18**(2), 253–284.
- SEKANINA, Z. (1976). Statistical Model of Meteor Streams. IV. A Study of Radio Streams from the Synoptic Year. *Icarus*, **27**(2), 265–321.
- SHIBA, Y. (2018). Eta virginids (EVI) four year cycle. *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, **46**(6), 184–190.
- SOUTHWORTH, R. B. a HAWKINS, G. S. (1963). Statistics of meteor streams. *Smithsonian Contributions to Astrophysics*, **7**, 261–285.
- TERENTJEVA, A. K. (1989). Fireball streams. *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, **17**(6), 242–245.
- ŠEGON, D., ANDREIĆ, Ž., KORLEVIĆ, K., NOVOSELNIK, F., VIDA, D. a SKOKIĆ, I. (2013). 8 new showers from Croatian Meteor Network data. *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, **41**(3), 70–74.

# A. Prílohy

Tabuľka A.1: Polohy geocentrických radiantov, rýchlostí a fyzikálne parametre pre meteory s určenou príslušnosťou k roju.

Kód meteoru	$\lambda$ [°]	$\alpha$ [°]	$\delta$ [°]	$v$ [km.s <sup>-1</sup> ]	Magnitúda	$P_E$	Typ	$m$ [kg]
EN040219_183043	315,4	131,22 ± 0,02	14,96 ± 0,01	18,99 ± 0,01	-8,6	-4,14	I	5,56E-01
EN130218_232807	325,0	157,55 ± 0,01	13,56 ± 0,06	28,02 ± 0,05	-10,4	-4,47	I	1,61E-01
EN230219_181613	334,6	150,00 ± 0,03	36,65 ± 0,07	17,18 ± 0,01	-9,2	-4,68	I/II	4,35E-01
EN240218_022841	335,2	171,49 ± 0,03	5,22 ± 0,02	32,75 ± 0,07	-3,6	-4,76	II	3,65E-04
EN230217_203818	335,2	132,12 ± 0,04	28,15 ± 0,06	13,29 ± 0,16	-6,0	-4,91	II	8,60E-03
EN240218_232107	336,1	147,27 ± 0,03	18,56 ± 0,07	15,36 ± 0,05	-2,9	-4,7	II	3,43E-03
EN240217_181119	336,1	150,20 ± 0,06	22,32 ± 0,05	18,17 ± 0,14	-1,5	-4,81	II	5,90E-04
EN270217_023122	338,5	171,66 ± 0,01	6,36 ± 0,01	29,39 ± 0,03	-12,4	-3,96	I	3,86E+00
EN020317_210949	342,2	141,40 ± 0,13	36,27 ± 0,13	13,69 ± 0,23	-5,1	-4,23	I	4,46E-02
EN060319_204604	345,7	176,24 ± 0,01	6,98 ± 0,02	27,67 ± 0,01	-10,9	-4,24	I	7,10E-01
EN100321_191736	350,2	178,19 ± 0,01	5,61 ± 0,01	26,88 ± 0,03	-4,5	-4,39	I	4,25E-03
EN120318_231735	352,1	179,73 ± 0,01	6,35 ± 0,01	26,46 ± 0,02	-5,1	-4,53	I	2,39E-03
EN140317_194345	354,2	181,66 ± 0,04	5,31 ± 0,02	26,51 ± 0,10	-5,8	-4,61	I/II	3,42E-03
EN140321_205321	354,2	179,98 ± 0,02	6,43 ± 0,02	25,17 ± 0,07	-3,7	-4,56	I/II	1,31E-03
EN140317_214938	354,3	146,49 ± 0,01	13,63 ± 0,07	12,87 ± 0,11	-6,5	-4,79	II	6,24E-02
EN150321_011020	354,4	182,14 ± 0,08	4,76 ± 0,17	26,54 ± 0,12	-6,7	-4,65	I/II	4,33E-03
EN150317_233402	355,3	186,58 ± 0,05	2,25 ± 0,03	29,40 ± 0,15	-5,3	-4,5	I	2,75E-03
EN200318_010224	359,1	196,09 ± 0,02	-5,55 ± 0,04	34,75 ± 0,22	-2,6	-4,84	II	1,66E-04
EN190320_201746	359,4	187,54 ± 0,04	3,38 ± 0,12	27,27 ± 0,16	-3,5	-5,41	IIIA	3,78E-04
EN210321_003342	0,3	188,77 ± 0,02	2,31 ± 0,01	27,64 ± 0,02	-9,1	-4,4	I	6,58E-02
EN230321_013723	2,4	190,27 ± 0,01	1,45 ± 0,01	27,33 ± 0,05	-6,4	-4,38	I	1,47E-02
EN240320_020220	3,6	184,71 ± 0,05	4,90 ± 0,10	23,01 ± 0,19	-1,9	-4,85	II	3,01E-04
EN310320_013723	10,5	182,34 ± 0,05	10,08 ± 0,08	17,60 ± 0,17	-2,8	-4,77	II	1,82E-03
EN010417_002254	11,2	199,01 ± 0,02	-6,23 ± 0,04	28,65 ± 0,18	-5,2	-4,69	I/II	3,63E-03
EN040419_010017	13,7	197,70 ± 0,01	-12,79 ± 0,01	27,79 ± 0,01	-4,2	-4,44	I	4,38E-03
EN040421_200530	15,0	187,13 ± 0,06	5,09 ± 0,07	19,65 ± 0,18	-2,7	-5,68	IIIA/IIIB	5,03E-04
EN060419_000614	15,7	177,51 ± 0,01	-13,57 ± 0,03	13,67 ± 0,01	-12,5	-5,32	II/IIIA	7,07E+01
EN060416_021415	16,5	214,23 ± 0,02	-9,02 ± 0,02	35,39 ± 0,20	-3,7	-4,49	I	5,67E-04
EN060419_224215	16,6	213,65 ± 0,02	-8,66 ± 0,04	34,27 ± 0,15	-3,4	-4,61	I/II	2,94E-04
EN070419_001427	16,6	204,18 ± 0,02	-14,62 ± 0,03	30,31 ± 0,24	-3,2	-4,79	II	4,33E-04
EN060418_204027	16,7	189,96 ± 0,07	26,05 ± 0,08	15,74 ± 0,27	-2,0	-4,86	II	5,81E-04
EN090419_001611	18,6	202,60 ± 0,02	-14,03 ± 0,07	28,21 ± 0,26	-2,9	-4,74	II	6,08E-04
EN080418_214207	18,8	216,97 ± 0,04	-9,23 ± 0,09	33,51 ± 0,29	-2,1	-5,12	II	8,41E-05
EN120420_190810	23,1	193,49 ± 0,08	21,38 ± 0,07	16,70 ± 0,07	-7,0	-5,76	IIIB	1,80E-02
EN120416_220224	23,2	179,93 ± 0,07	16,59 ± 0,14	13,07 ± 0,27	-2,5	-4,62	I/II	4,11E-03
EN120420_231924	23,2	207,77 ± 0,02	-11,55 ± 0,04	27,40 ± 0,17	-1,8	-4,43	I	3,22E-04
EN140420_193943	25,0	211,68 ± 0,07	-12,09 ± 0,19	27,77 ± 0,08	-6,6	-4,58	I/II	1,47E-02
EN150420_015418	25,3	194,37 ± 0,02	-3,08 ± 0,02	17,02 ± 0,04	-2,1	-4,78	II	1,13E-03
EN150420_232433	26,2	219,55 ± 0,01	-11,14 ± 0,02	32,50 ± 0,07	-3,0	-4,73	II	3,26E-04
EN160420_210659	27,1	180,77 ± 0,01	-10,96 ± 0,04	15,73 ± 0,06	-2,5	-5,24	II/IIIA	2,61E-03
EN170420_001619	27,2	220,31 ± 0,03	-10,38 ± 0,03	31,65 ± 0,09	-4,1	-5,14	II	5,66E-04
EN190420_215559	30,0	202,65 ± 0,03	4,91 ± 0,04	19,24 ± 0,13	-2,2	-5,8	IIIB	4,62E-04
EN200418_205703	30,5	195,07 ± 0,07	-1,57 ± 0,04	16,13 ± 0,03	-8,4	-4,86	II	2,49E-01
EN220420_232942	33,0	224,42 ± 0,01	-10,96 ± 0,01	30,67 ± 0,04	-11,1	-4,53	I	2,47E-01



Tabuľka A.2: Elementy heliocentrickej dráhy a hodnoty  $D$  kritérií pre meteory s určenou príslušnosťou k roju.

Kód meteoru	$a$ [au]	$e$	$q$ [au]	$I$ [°]	$\omega$ [°]	$\Omega$ [°]	Roj	$D_{SH}$	$D_D$	Pozn.
EN040219_183043	2,111 ± 0,004	0,681 ± 0,001	0,674 ± 0,001	1,77 ± 0,01	77,35 ± 0,04	135,44	SDL	0,08	0,05	T89
EN130218_232807	2,269 ± 0,014	0,824 ± 0,001	0,399 ± 0,001	4,21 ± 0,06	288,59 ± 0,06	324,95	FPL	0,20	0,07	RJ
EN230219_181613	2,550 ± 0,006	0,686 ± 0,001	0,802 ± 0,001	10,98 ± 0,03	237,71 ± 0,07	334,57	LAL	0,13	0,05	J16b
EN240218_022841	2,556 ± 0,025	0,893 ± 0,001	0,274 ± 0,001	2,16 ± 0,03	302,28 ± 0,06	335,16	FSL	0,03	0,04	J18
EN230217_203818	2,569 ± 0,066	0,657 ± 0,009	0,882 ± 0,001	3,61 ± 0,05	223,47 ± 0,04	335,18	LAL	0,18	0,07	J16b
EN240218_232107	1,937 ± 0,010	0,600 ± 0,002	0,776 ± 0,001	2,31 ± 0,03	245,02 ± 0,06	336,03	LAL	0,13	0,08	J16b
EN240217_181119	2,511 ± 0,054	0,705 ± 0,007	0,742 ± 0,001	5,10 ± 0,05	246,81 ± 0,09	336,08	LAL	0,15	0,07	J16b
EN270217_023122	2,249 ± 0,007	0,842 ± 0,001	0,355 ± 0,001	3,07 ± 0,01	293,78 ± 0,01	338,44	FSL	0,10	0,10	J18
EN020317_210949	2,768 ± 0,114	0,677 ± 0,014	0,895 ± 0,001	7,32 ± 0,12	220,61 ± 0,12	342,24	LAL	0,15	0,06	J16b
EN060319_204604	2,356 ± 0,003	0,821 ± 0,001	0,421 ± 0,001	5,17 ± 0,02	286,10 ± 0,03	345,72	EVI	0,08	0,05	J16a
EN100321_191736	2,498 ± 0,012	0,818 ± 0,001	0,456 ± 0,001	4,36 ± 0,01	281,72 ± 0,02	350,15	EVI	0,07	0,02	J16a
EN120318_231735	2,514 ± 0,007	0,812 ± 0,001	0,473 ± 0,001	5,44 ± 0,01	279,78 ± 0,02	352,08	EVI	0,07	0,03	J16a
EN140317_194345	2,507 ± 0,037	0,812 ± 0,003	0,470 ± 0,001	5,30 ± 0,04	280,13 ± 0,08	354,18	EVI	0,04	0,02	J16a
EN140321_205321	2,462 ± 0,026	0,792 ± 0,002	0,511 ± 0,001	5,16 ± 0,03	275,67 ± 0,04	354,21	EVI	0,11	0,06	J16a
EN140317_214938	2,566 ± 0,045	0,652 ± 0,006	0,894 ± 0,001	0,05 ± 0,02	221,88 ± 0,02	354,24	LAL	0,11	0,05	J16b
EN150321_011020	2,439 ± 0,043	0,810 ± 0,004	0,464 ± 0,002	5,04 ± 0,16	281,07 ± 0,24	354,39	EVI	0,02	0,01	J16b
EN150317_233402	2,532 ± 0,055	0,851 ± 0,004	0,378 ± 0,002	5,49 ± 0,06	290,40 ± 0,11	355,34	EVI	0,13	0,10	Sh18
EN200318_010224	2,556 ± 0,083	0,915 ± 0,003	0,217 ± 0,002	2,16 ± 0,07	309,50 ± 0,06	359,13	KVI	0,15	0,24	Š13
EN190320_201746	2,581 ± 0,062	0,825 ± 0,005	0,452 ± 0,002	6,12 ± 0,12	282,04 ± 0,16	359,42	EVI	0,04	0,03	Sh18
EN210321_003342	2,578 ± 0,006	0,830 ± 0,001	0,438 ± 0,001	5,77 ± 0,01	283,59 ± 0,03	0,33	EVI	0,08	0,04	Sh19
EN230321_013723	2,532 ± 0,018	0,824 ± 0,001	0,445 ± 0,001	5,48 ± 0,02	283,03 ± 0,03	2,37	EVI	0,09	0,04	Sh20
EN240320_020220	2,537 ± 0,062	0,768 ± 0,006	0,589 ± 0,002	4,80 ± 0,10	266,65 ± 0,12	3,63	NVI	0,17	0,10	Se73
EN310320_013723	2,390 ± 0,051	0,682 ± 0,007	0,759 ± 0,002	5,29 ± 0,09	245,95 ± 0,06	10,54	AVB	0,11	0,06	SH
EN010417_002254	2,528 ± 0,062	0,843 ± 0,005	0,397 ± 0,002	1,88 ± 0,06	288,45 ± 0,05	11,26	OAV	0,16	0,06	J16b
EN040419_010017	2,491 ± 0,003	0,829 ± 0,000	0,426 ± 0,001	5,17 ± 0,01	105,41 ± 0,01	193,71	OAV	0,12	0,06	J16b
EN040421_200530	2,863 ± 0,090	0,749 ± 0,008	0,720 ± 0,001	4,40 ± 0,06	249,79 ± 0,11	14,99	AVB	0,05	0,03	SH
EN060419_000614	1,637 ± 0,002	0,509 ± 0,001	0,804 ± 0,001	5,55 ± 0,01	65,26 ± 0,02	195,65	SGV	0,13	0,10	PG
EN060416_021415	2,649 ± 0,080	0,922 ± 0,003	0,207 ± 0,002	8,36 ± 0,11	310,83 ± 0,06	16,50	KVI	0,07	0,20	Š13
EN060419_224215	2,429 ± 0,050	0,907 ± 0,002	0,226 ± 0,001	8,04 ± 0,09	308,89 ± 0,06	16,59	KVI	0,10	0,24	Š13
EN070419_001427	2,586 ± 0,088	0,864 ± 0,006	0,351 ± 0,002	5,34 ± 0,02	113,67 ± 0,03	196,63	OAV	0,07	0,06	J16b
EN060418_204027	2,302 ± 0,084	0,631 ± 0,014	0,849 ± 0,001	12,06 ± 0,19	232,57 ± 0,14	16,75	ACO	0,08	0,05	PG
EN090419_001611	2,642 ± 0,100	0,841 ± 0,007	0,421 ± 0,003	4,58 ± 0,06	105,65 ± 0,05	198,60	OAV	0,05	0,04	J16b
EN080418_214207	2,022 ± 0,066	0,891 ± 0,005	0,219 ± 0,002	8,95 ± 0,20	311,05 ± 0,11	18,76	KVI	0,11	0,23	Š13
EN120420_190810	2,768 ± 0,034	0,696 ± 0,004	0,841 ± 0,001	11,42 ± 0,05	232,52 ± 0,11	23,06	ACO	0,02	0,01	PG
EN120416_220224	2,522 ± 0,106	0,642 ± 0,016	0,903 ± 0,002	5,42 ± 0,14	221,69 ± 0,07	23,21	NGV	0,05	0,04	T89
EN120420_231924	2,515 ± 0,058	0,827 ± 0,005	0,436 ± 0,002	0,13 ± 0,04	104,95 ± 0,15	202,68	OAV	0,09	0,06	J16b
EN140420_193943	2,268 ± 0,028	0,821 ± 0,002	0,406 ± 0,001	0,75 ± 0,19	288,63 ± 0,19	25,14	LVI	0,08	0,09	L71
EN150420_015418	2,095 ± 0,008	0,643 ± 0,002	0,747 ± 0,001	1,46 ± 0,02	249,55 ± 0,02	25,35	AVB	0,04	0,03	L71
EN150420_232433	2,581 ± 0,027	0,891 ± 0,001	0,282 ± 0,001	6,13 ± 0,04	301,68 ± 0,03	26,18	DLI	0,16	0,20	PG
EN160420_210659	2,862 ± 0,033	0,706 ± 0,004	0,842 ± 0,001	4,29 ± 0,01	52,36 ± 0,02	207,03	SGV	0,10	0,07	PG
EN170420_001619	2,418 ± 0,029	0,876 ± 0,002	0,299 ± 0,001	7,17 ± 0,05	300,18 ± 0,06	27,19	DLI	0,14	0,17	PG
EN190420_215559	2,742 ± 0,057	0,731 ± 0,006	0,738 ± 0,001	7,63 ± 0,06	248,23 ± 0,06	30,03	AVB	0,02	0,01	J16a
EN200418_205703	2,345 ± 0,012	0,660 ± 0,002	0,797 ± 0,001	2,12 ± 0,02	241,27 ± 0,10	30,51	AVB	0,08	0,04	L71
EN220420_232942	2,495 ± 0,014	0,866 ± 0,001	0,334 ± 0,001	7,45 ± 0,02	296,03 ± 0,02	33,02	DLI	0,11	0,12	PG

*Pozn.:* Hodnoty  $D$  kritérií boli určované voči autorom v poznámke. V prípade porovnávania výsledkov s viacerými autormi bol zvolený ten s najmenšou hodnotou  $D$  kritérií.